

彎曲水路の河床変動に関する研究 (2)

村 本 嘉 雄・吉 村 知 司

STUDIES ON THE SEDIMENTATION IN CURVED OPEN CHANNELS (2)

By *Yoshio* MURAMOTO and *Tomotsuka* YOSHIMURA

Synopsis

In the previous paper¹⁾, we discussed the process and mechanism of the progression of the local scour in the alluvial curved channels on the basis of the experimental studies, and developed the theoretical analysis for the variation of lateral bed profiles at the initial stage of scour.

This paper proposes an analytical approach for the progressive stage of scour, which describes the longitudinal variation of bed profile with time along the outside wall of curved reach. The fundamental equations derived in this analysis include two unknown factors. The one is characteristics of flow pattern near the scour hole, and the other is the variation of stream width near the outside wall or longitudinal profiles of lateral scour front with time. Concerning to these problems, we discuss the results of the measurements of flow direction and velocity near the bed and the observation of Dunes (Bars) in the curved reach.

1. は し が き

彎曲水路における河床変動は外岸（凹岸）ぞいに進行する局所洗掘によって特徴づけられる。こうした局所洗掘現象は一般的には断面急変部あるいは水理構造物周辺などの洗掘現象と同様に急激な局所的エネルギー変化を緩和する方向に進行すると考えられる。しかし、通常、彎曲部におけるエネルギー損失量は小さく、水路全断面で平均化した一次元的な取り扱いからは平均な洗掘量を推定することも難しい。とくに、外岸ぞいの洗掘過程を記述するためには流水の三次元性を加味した、二次元的な河床変動の解析を必要とし、こうした点が彎曲部における局所洗掘の解析を困難にしている。

本論文においては、前論文¹⁾に続いて洗掘進行後の外岸付近における河床変動について考察する。まず2では、外岸の河床高と彎曲部における洗掘、堆積の境界線の形状との関連性に着目して、境界線と外岸とで限られる流路を三角形断面と仮定し、流路巾と外岸河床高を未知関数とした一次元解析法について述べる。この解析では、結局、境界線の形状の時間的、場所的变化と境界線を通じての流砂、流水の出入りが問題となる。こうした点から3で洗掘の進行にともなう流速、流向分布の変化を測定結果より検討し、洗掘穴周辺の流れの特性を明らかにする。また、4では境界線の形状変化に関係する主要素として、彎曲部に発生する砂堆に着目し、その形状および移動特性を実験的に検討する。

2. 彎曲水路の河床変動と洗掘過程の解析

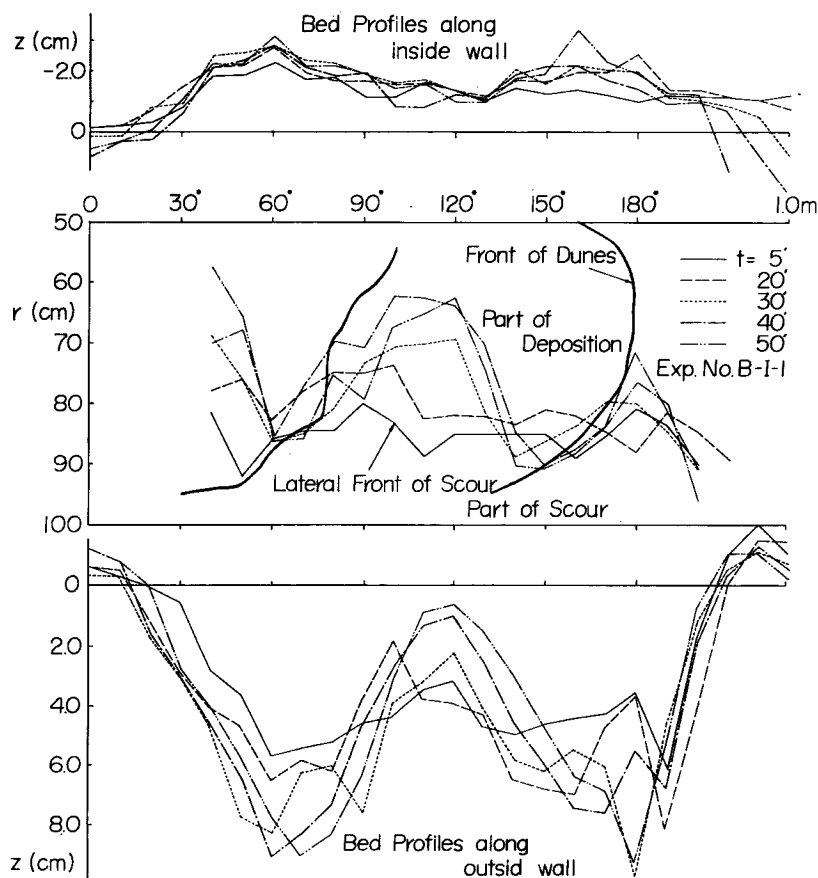
2-1 彎曲水路における河床変動の特徴

一様にならされた河床状態から洗掘, 堆積が進行する過程は, 前報で詳述したように現象的にはつぎの三段階に分けられる。

- (1) 彎曲部の終点付近で洗掘が生じ, 上流へ波及する過程
- (2) 外岸ぞいに一様な洗掘が進行する過程
- (3) 洗掘箇所が分離して洗掘穴が発達し, 最終状態にいたる過程

(1), (2) の初期の洗掘, 堆積過程における河床変動の機構は固定床で数多く観察されている彎曲部固有の底面せん断応力分布と二次流の分布特性によって説明できる。前報では, とくに (2) の過程に着目して彎曲部の半径方向に一次元的な解析を行ない河床の横断形状の時間的変化を論じた。しかし, (3) の過程では, 横方向と同程度に流下方向の変化が顕著になり, 彎曲部固有の砂堆の発達もともなって, 流れおよび流砂の特性は (1), (2) の過程から著るしく変化する。

こうした, 洗掘, 堆積の進行過程を河床の平面的変化を含めて特徴的に示すと Fig. 1(a), (b) のようである。Fig. 1(a), (b) の実験条件は Table 2 に示す。これらの図には, 初期河床を基準とした内岸, 外岸にお



(a)

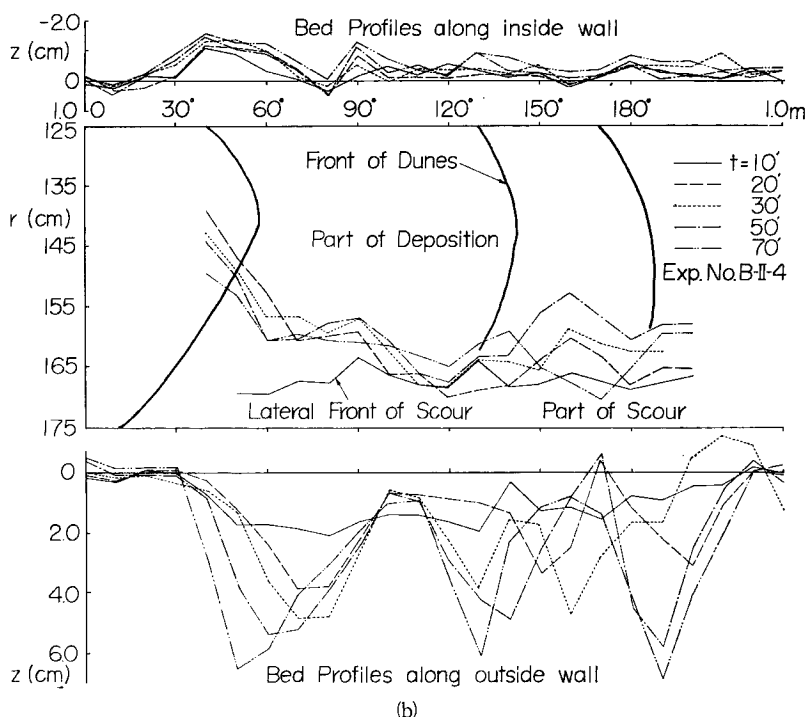


Fig. 1 (a), (b) Variation of scour front and bed profiles with time along the inside and outside wall.

ける河床高および洗掘、堆積の境界線の時間的変化と最終時点における砂堆の前縁線が示してある。

Fig. 1(a), (b) から内岸、外岸における河床形状と洗掘、堆積の境界線の形状が時間の経過とともに、流下方向にはほぼ一様な状態から顕著な波動状態に変化していくのがわかる。また、砂堆の前縁線の位置も河床高および境界線の変化に対応し、最大堆積高、最大洗掘深および洗掘域が内岸へはりだす位置と前縁線との相対的な位置がほぼ一定している。とくに曲率半径の小さい Fig. 1(a) の場合には砂堆がほぼ停止状態にあるので以上の特徴が顕著に現われている。Fig. 2(b) では、4 で詳述するように、下流の砂堆が移動するので、河床形状、境界線も流下方向に変化している。

このように洗掘の進行した状態では、河床は平面的に顕著な波動性を呈し、こうした河床変動を全体的に記述するには、当然二次元的な解析を必要とする。しかし、洗掘状態における彎曲部の流れを解析的に表示することが難しく、現状では二次元解析は望めない。ここでは、洗掘進行後の河床変動が外岸付近に集約されている点および Fig. 1 に示した洗掘、堆積の境界線と外岸の河床形状との関連性に着目して、流下方向に一次元化した解析を行なう。

2-2 洗掘過程の解析

いま、座標系を Fig. 2 に示すように表わし、洗

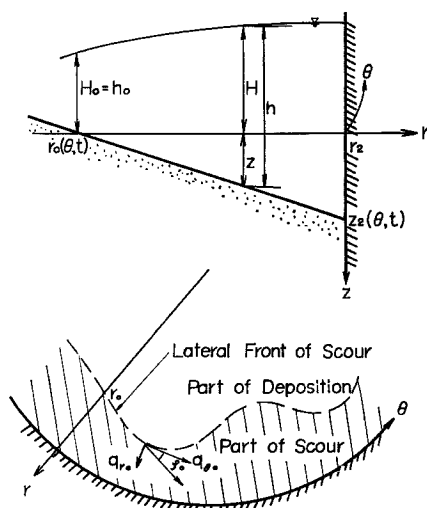


Fig. 2 Schematic diagram for bed profiles near the outside wall and notation.

掘, 堆積の境界線 $r=r_0(\theta, t)$ と外岸 $r=r_2$ で限られる範囲の河床変動を考える。河床形状は, 外岸付近では洗掘の進行後にはほぼ三角形断面となることから

$$z(r, \theta, t) = \frac{r-r_0}{r_2-r_0} z_2(\theta, t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表わす。ここで, $z_2(\theta, t)$ は初期河床を基準とした外岸における洗掘深である。

流砂量の連続式は二次元の場合, 円筒座標系で表示すると,

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial q_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r q_r) \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで, λ は空隙率の $1/100$, q_θ , q_r はそれぞれ接線方向 (流下方向) および半径方向の流砂量である。

つぎに, 外岸付近の平均的な河床変動を z_2 で代表して論ずるために, (2) 式に (1) 式を代入し, 両辺に r を乗じたのち r_0 から r_2 まで積分すると

$$\begin{aligned} \frac{\partial z_2}{\partial t} = \frac{6}{(1-\lambda)b(3r_2-b)} \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} \int_{r_0}^{r_2} q_\theta dr - q_{\theta 0} \frac{\partial b}{\partial \theta} \right. \\ \left. - (r_2-b)q_{r0} - \frac{1-\lambda}{6} (3r_2-b)z_2 \frac{\partial b}{\partial t} \right\} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

が得られる。ここで, $b=r_2-r_0$, $q_{\theta 0}$, q_{r0} は $r=r_0$ における接線方向, 半径方向の流砂量である。すなわち, 上式は流路巾が場所的, 時間的に変化し, $r=r_0$ の境界線を通じて流砂が出入りする場合は流砂の連続式を表わしている。(3) 式を基礎式として解析を行なうためには, 流量巾の変化, 流砂量および流れの関係を導入する必要がある。

まず流路巾の変化を特徴づける式は, 一般的には

$$\frac{\partial b}{\partial t} + \omega_{\theta b} \frac{\partial b}{\partial \theta} = v_b \quad \dots\dots\dots (4)$$

の形で表わされる。ここで, $\omega_{\theta b}$ は流路巾の変化に関する接線方向の角速度, v_b は半径方向の速度である。 $\omega_{\theta b}$ は洗掘, 堆積の境界線の移動速度の接線成分 u_b を用いて

$$u_b = \omega_{\theta b}(r_2-b) \quad \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。そして, u_b , v_b は前述のように砂堆の移動速度に対応するものと考えられる。また, $q_{\theta 0}$ と q_{r0} との関係は Fig. 2 に示すように, 境界線上の流砂の方向と接線方向とのなす角 φ_0 を用いて

$$q_{r0} = q_{\theta 0} \tan \varphi_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

で表わされる。

洗掘進行後の局所的な流砂量 q_θ の分布式は現在のところ明らかでないが, 平均的な流砂量 $\bar{q}_\theta$ に対しては前報および 4-1 で示されるように Brown 型の次式が仮定できる。

$$\bar{q}_\theta = \frac{1}{b} \int_{r_0}^{r_2} q_\theta dr = K d \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d \right\}^{-m} \left\{ 1 - \left(\frac{u_{*c}}{\bar{u}_*} \right)^2 \right\}^m \bar{u}_*^{2m+1} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで, $\bar{u}_*$ は接線方向の摩擦速度の流路巾平均値, u_{*c} は砂粒の移動限界摩擦速度, d は河床砂の平均粒径, σ , ρ はそれぞれ砂および水の密度, K , m は定数である。

つぎに, 平均摩擦速度 $\bar{u}_*$ を洗掘進行後の弯曲部流れの水理量で表わす必要がある。洗掘の初期においては, その関係式は底面摩擦と重力との平衡関係, Manning の流速式, 流れの遠心力の関係および連続式を仮定することによって表わすことができた。しかし, 洗掘の進行後においては, 水面こう配の力学的意味が不明確になりまた水深の増加と流速の増加が対応しなくなるので, 最初の二つの条件式を用いることができない。したがって, ここでは単純に $\bar{u}_*$ は流路巾平均流速 $\bar{u}$ に比例するとして

$$\bar{u}_* = k \bar{u}, \quad \bar{u} = \frac{Q}{b \bar{h}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

で表わす。ここで, k は定数, Q は流路内の流量で一般的には $Q(\theta, t)$ ⑧1, $\bar{h}$ は平均水深である。なお,

k の値は Table 2 に示した U/U_* の値からわかるように、本実験の場合 $k=0.10\sim0.20$ であって変化が小さく定数として定め易い。

(8) 式の $\bar{u}$ あるいは $\bar{h}$, Q は、鉛直方向平均流速 u によく用いられる強制渦の分布

$$u = cr = \frac{u_2 r}{r_2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

を仮定し、流れの遠心力の関係

$$\frac{dH}{dr} = \frac{u^2}{gr} \quad \dots\dots\dots (10)$$

を用いることによって定まる。上式で、 c は定数、 u_2 は外岸における平均流速、 $H(\theta, t)$ は初期河床を基準とした水位であって、Fig. 2 に示すように

$$h = H + z \quad \dots\dots\dots (11)$$

の関係にある。(1), (9), (10) および (11) 式から $r=r_0$ で $H=H_0$ として平均水深および流量を求めると、

$$\bar{h} = \frac{u_2^2}{6g} \frac{b}{r_2} \left(3 - 2 \frac{b}{r_2} \right) + H_0 + \frac{1}{2} z_2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$Q = u_2 b \left\{ \frac{u_2^2}{8g} \frac{b}{r_2} \left(2 - \frac{b}{r_2} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(2 - \frac{b}{r_2} \right) H_0 + \frac{1}{6} \left(3 - \frac{b}{r_2} \right) z_2 \right\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

となり、これらより H_0 を消去すると次式がえられる。

$$\bar{h} = \frac{\frac{2Q}{u_2 b} + \frac{u_2^2 b}{12gr_2} \left(2 - \frac{b}{r_2} \right)^2 \left(6 - 7 \frac{b}{r_2} \right) - \frac{1}{6} \frac{b}{r_2} z_2}{2 - \frac{b}{r_2}} \quad \dots\dots\dots (14)$$

あるいは普通上式の分母の第2項は他の項に比して小さいので

$$\bar{h} = \frac{\frac{2Q}{u_2 b} - \frac{1}{6} \frac{b}{r_2} z_2}{2 - \frac{b}{r_2}} \quad \dots\dots\dots (14)'$$

で近似できる。

以上の条件から、(3) 式に (6), (7), (8) および (14) 式を用い、(4), (5) 式と連立させることによって、 $b(\theta, t)$, あるいは $z_2(\theta, t)$ の変化に関する解析ができる。しかし、(4), (5) 式における u_0, v_0 , (6) 式における $\tan \varphi_0, q_{\theta_0}$ および (14) 式における u_2 については現状では十分な知見が得られていなく、その関数形を定めることができない。これは、結局、洗掘進行後の流速、流向の変化および彎曲部に発生する砂堆の移動特性から手がかりが得られると思われ、この点に関して 3, 4 で実験的検討を行なう。

以下では、一応、流路巾の時間的变化および境界線を通じての流砂、流水の出入りが無いものとして解析を進める。すなわち、(3) 式で $q_{\theta_0} = q_{r_0} = 0$, $\partial b / \partial t = 0$ として、 $b(\theta)$ と $z_2(\theta, t)$ との関係を考察する。条件式としては、(7), (8) 式と (14)' 式を用い、 Q, u_2 は一定と考える。 u_2 一定の仮定は、3 で述べるように外岸が固定されている場合には妥当なものと考えられる。

まず、(3) 式に (7) 式を用い、関数関係を示すと、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial z_2}{\partial t} &= \frac{6\bar{q}_0}{(1-\lambda)b(3r_2-b)} \left(M \frac{\partial b}{\partial \theta} + N \frac{\partial z_2}{\partial \theta} \right) \\ M &= 1 + \frac{b}{\bar{q}_0} \frac{d\bar{q}_0}{d\bar{u}_*} \left(\frac{\partial \bar{u}_*}{\partial b} + \frac{\partial \bar{u}_*}{\partial \bar{h}} \frac{\partial \bar{h}}{\partial b} \right), \quad N = \frac{b}{\bar{q}_0} \frac{d\bar{q}_0}{d\bar{u}_*} \frac{\partial \bar{u}_*}{\partial \bar{h}} \frac{\partial \bar{h}}{\partial z_2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (15)$$

で表わされる。上式で各微分項はつぎのようになる。

$$\frac{1}{\bar{q}_0} \frac{d\bar{q}_0}{d\bar{u}_*} = (2m+1)\bar{u}_*^{-1} + 2m\bar{u}_*^{-1} \left(\frac{u_{*c}}{\bar{u}_*} \right)^2 \left\{ 1 - \left(\frac{u_{*c}}{\bar{u}_*} \right)^2 \right\}^{-1} \quad \dots\dots\dots$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_*}{\partial b} &= -\frac{\bar{u}_*}{b}, \quad \frac{\partial \bar{u}_*}{\partial \bar{h}} = -\frac{\bar{u}_*}{\bar{h}} \\ \frac{\partial \bar{h}}{\partial b} &= \frac{-\left\{ \frac{4Q}{u_2 b} \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{1}{3} \frac{z_2}{r_2} \right\}}{\left(2 - \frac{b}{r_2} \right)^2}, \quad \frac{\partial \bar{h}}{\partial z_2} = \frac{-\frac{1}{6} \frac{b}{r_2}}{\left(2 - \frac{b}{r_2} \right)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

(15), (16) 式から明らかなように, 常に $b < r_2$ なので $\partial z_2 / \partial \theta$ の係数 $N > 0$ であって, z_2 の擾乱は上流へ伝播することを表わしている。すなわち $\partial b / \partial \theta = 0$ の点において, $\partial z_2 / \partial t \equiv 0$ は $\partial z_2 / \partial \theta \equiv 0$ に同順に対応する。一方, $\partial b / \partial \theta$ の係数 M は第2項が負になる場合があるので, その符号は一般に定まらず, $\partial z_2 / \partial \theta = 0$ の点で $\partial z_2 / \partial t \equiv 0$ は

$$\left\{ 1 + L \frac{\left(4 - \frac{b}{r_2} \right) \frac{z_2}{r_2} - \frac{12Q}{u_2 r_2 b}}{\left(2 - \frac{b}{r_2} \right) \left(\frac{12Q}{u_2 b^2} - \frac{z_2}{r_2} \right)} \frac{\partial b}{\partial \theta} \equiv 0 \right\} \dots\dots\dots (17)$$

$$L = (2m+1) + 2m \left(\frac{u_{*c}}{\bar{u}_*} \right)^2 \left\{ 1 - \left(\frac{u_{*c}}{\bar{u}_*} \right)^2 \right\}^{-1}$$

に対応する。

いま, Fig. 1(a), (b) に示した B—I—1 の $t=40'$ および B—II—4 の $t=50'$ の実験値から $b(\theta)$, $z_2(\theta)$ の値を読みとり, $\partial b / \partial \theta = 0$ あるいは $\partial z_2 / \partial \theta = 0$ となる点における $\partial z_2 / \partial t$ の値を (15), (16) 式から求めると Table 1 のようになる。ただし, 各実験ケースの Q , k としては Table 2 の値を用い, u_2 は次節の実験値を参考にして $u_2 = 50$ cm/sec, また (7) 式で $K=30$, $m=2$ と仮定した。Table 1 に示した $\partial z_2 / \partial t$ の計算値を各ケースでそれ以後の河床形状と比較すると, 洗掘, 堆積の傾向および相対的大きさはほぼ対応している。しかし, 一時点で $\theta = 10^\circ$ 毎の測定値からの計算で, しかも b , z_2 が極値をとる個所だけの比較なので十分な検討はできない。

つぎに, Fig. 1(a), (b) にみられる b , z_2 の時間的な推移を上述の諸点から検討すると, 傾向の一致する個所と明確でない個所がある。すなわち, 弯曲部 60° 付近に発生する洗掘穴の上流側への移動および流路巾の変化と洗掘, 堆積の相互関係は上述の傾向によく一致している。とくに Fig. 1(b) においてその傾向が顕著に現われており, Fig. 1(a) では, 流路巾および外岸の河床高が最大あるいは最小となる位置がほぼ一致した点で最終状態に達しているのがわかる。しかし, 弯曲部の後半では, Fig. 1(b) にみるように下流側へ

Table 1 Examples of calculation based on Eqs. (15) and (16).

Exp. No.	θ	$\frac{\partial b}{\partial \theta}$ (cm)	$\frac{\partial z_2}{\partial \theta}$ (cm)	b (cm)	z (cm)	M	N	$\frac{\partial z}{\partial t} \times 10^3$ (cm/min)
B—I—1 ($t=40'$)	60°	0	0					0
	100°	0	-9.17	38.0	2.8		24.0	-478
	120°	20.1	0	36.0	1.0	-0.523		12.2
	150°	0	7.45	10.0	5.9		0.0439	9.25
	170°	37.3	0	16.5	7.6	23.0		244
B—II—4 ($t=50'$)	60°	0	0					0
	90°	0	-8.03	18.0	2.5		0.172	-0.69
	100°	-28.7	0	12.0	0.7	0.743		-23.5
	120°	0	9.17	7.0	2.9		0.0101	0.30
	140°	13.8	0	12.0	4.8	0.778		11.8
	160°	0	-8.60	22.0	0.8		0.310	-0.886

洗掘穴が移動する場合が多く、こうした特性は(15)式からは説明できない。

以上、(15)式の概括的な検討を行なったが、(15)式に(16)式を代入し、特性曲線表示をするとなつぎのようになる。

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{6L}{(1-\lambda)} \frac{\bar{q}_0}{b(3r_2-b)} \frac{\frac{b}{r_2}}{\frac{12Q}{u_2 b^2} - \frac{z_2}{r_2}} \dots\dots\dots (18)$$

上で

$$\frac{dz_2}{dt} = \frac{6\bar{q}_0}{(1-\lambda)b(3r_2-b)} \left\{ 1 + L \left(\frac{4-\frac{b}{r_2}}{2-\frac{b}{r_2}} \frac{\frac{z_2}{r_2} - \frac{12Q}{u_2 b^2}}{\frac{12Q}{u_2 b^2} - \frac{z_2}{r_2}} \right) \right\} \frac{\partial b}{\partial \theta} \dots\dots\dots (19)$$

結局、上式で流路形状 $b_0(\theta)$ および洗掘初期の河床形状 $z_2(\theta, t_0)$ を仮定すれば、 $\bar{q}_0, L$ は(7)、(8)、(14)' 式で与えられるから、 $b_0(\theta)$ に対する $z_2(\theta, t)$ の変化が記述できる。(18)、(19)式にもとづく解析の適用性については今後検討していく予定である。

3. 洗掘状態における流速、流向分布の特性

3-1 実験の概要

流速、流向分布の測定は、Fig. 1(b) と同じ条件 (B-II-4) で、初期河床、通水後 $t=5'40'', 20', 30'$ の

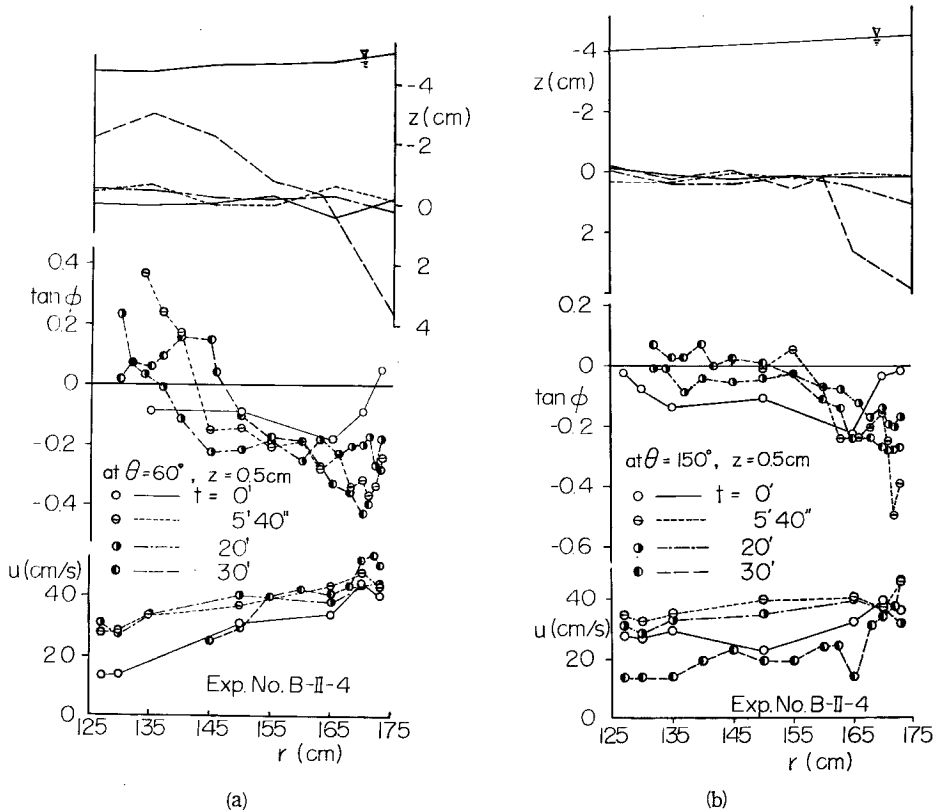


Fig. 3 (a), (b) Radial distribution of flow direction and longitudinal velocity corresponding to each scouring stage.

4段階において河床を固定して行なった。河床の固定には水系ビニール塗料を用い、河床粗度が変化しないように留意した。

流速測定には直径 1 mm のビーター管を用い、流向測定には最初円柱型ヨーメーターを用いたが、測定に長時間を要するので、5'40" の段階から翼型流向計を使用した。流向計の翼としては巾 6 mm, 長さ 16 mm の金属板を用い、翼と連結した指針の振れを分度内上で読みとった。なお、ヨーメーターと翼型流向計の測定結果にはほとんど差がないこと、流向計の特性変化、設置誤差も無視できることを繰り返し測定によって確認した。

流速、流向の測定点は弯曲部 30° 毎の断面で半径方向 7 点、鉛直方向に 5～10 点で壁面および底面近くで測点を密にとっている。また、翼型流向計を使用してから、流向の測点を半径方向に 15～20 点、鉛直方向に底面より 0.5 cm の点から 0.5 cm 間隔で水面付近まで測定し、 $t=30'$ の段階では洗掘穴の周辺を詳細に測定した。ここでは、以上の測定結果のうち、前節との関連からとくに底面付近の流速、流向の測定値について検討する。

3-2 洗掘にともなう流速、流向分布の変化

Fig. 3(a), (b) はそれぞれ 60° と 150° の断面で $t=0\sim30'$ の 4 段階について、接線方向の流速および流向の半径方向の分布と河床形状の変化とを比較したものである。流向分布は (6) 式と同様に流速ベクトルが接線方向となす角を φ として $\tan \varphi$ に換算して示してある。 $\varphi < 0$ は内岸方向、 $\varphi > 0$ は外岸方向への流向を表わし、 $\tan \varphi = u/v$ である。

60°, 150° の断面はいづれも洗掘深がほぼ最大となり堆積も著しい個所であるが、とくに、60° の断面では、 $t=30'$ で砂堆が発生して Fig. 3(a) にみるように内岸の堆積が著しくなっている。

まず、流向分布を検討すると、 $t=0$ では水路の中央部で $\tan \varphi < 0$ 、側壁近くで 0 に近づく分布を示している。また全体として内方より外方で $\tan \varphi$ の絶対値が大きくなっており、前報で示した分布形と中央部の傾向が異なる。これは、内岸付近から若干流れがはく離しており、その影響によるものか、二次流による

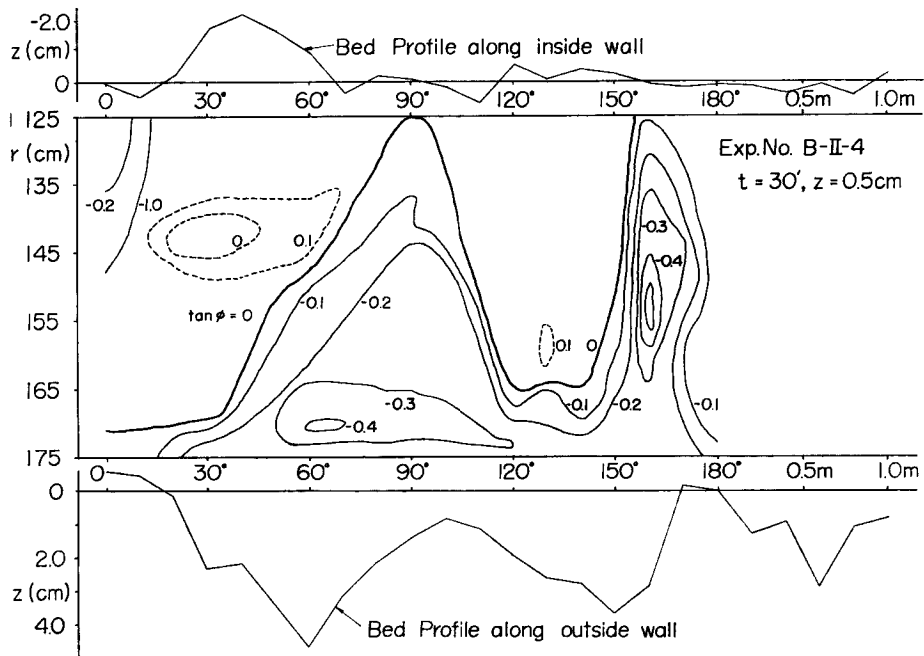


Fig. 4 Equi-flow direction line near the bed.

Kármán 定数の増加が半径方向に不均一なことによるかは現在のところ明らかでない。

$t=5'40''$ 以降の流向分布は、外岸よりで $\tan \varphi$ の絶対値が $t=0$ の場合より増加し、内岸よりでは減少し、さらに $\tan \varphi < 0$ から $\tan \varphi > 0$ へ変化しているのが注目される。しかし、外岸近くの $\tan \varphi$ の値は $t=5'40''$ 以降ではほぼ一定となり、内岸近くの変化が顕著に現われている。とくに、 60° の断面では、内岸近くの流向変化が著しく、これは砂堆の発達あるいは堆積過程に対応している。すなわち、砂堆の発生、発達にともなって流砂の方向が内方から外方に変化し、その状態では掃流力が小さいので、内岸の堆積が停止することを示している。

一方、流速分布について $t=0 \sim 30'$ の測定値を検討すると、内岸よりで時間の経過とともに減衰し、外岸よりではほとんど一定であって、その値は 60° と 150° においてもほぼ等しい。そのため、流速分布は全体として半径方向に急こう配の分布形に変化するが、外岸近くの変化は小さいので、洗掘、堆積の境界線付近を境にして屈折した分布形になる。こうした傾向は鉛直方向に異なる測点においても認められ、鉛直方向に平均化した場合には分布形の曲折がさらに顕著になる。

こうした点から 2-2 の (9) 式の仮定および外岸の流速 u_2 が流下方向および時間的に一定とした仮定はほぼ妥当なものと考えられる。しかし、洗掘の進行による流量の増加、すなわち、水深、流路巾の増加に対応した流れの流入が存在するわけで、今後、流れ、連続式にこうした点を加味していく必要がある^{註1)}。

また、従来、洗掘の増加によって外岸付近の流速は増加し、二次流が減衰する方向に河床変動が進行するという推測がなされている。上述の結果は、こうした考えが少くとも側壁が固定された彎曲水路では妥当なものではなく、洗掘の進行後においても外岸の河床変動に対する二次流の影響を無視できないことを示すものと考えられる。

3-3 洗掘穴付近の流向分布の特性

前項では洗掘の卓越する個所における流向分布の変化を述べたが、彎曲部全体の平面的流向特性を検討するために、 $t=30'$ の段階で $\tan \varphi$ の等分布線を示すと Fig. 4 のようである。この段階における彎曲部の外岸、内岸ぞいの河床形状は同図にみるように、 60° 、 150° 付近で最大の洗掘を示し、 40° 付近で堆積が最大となっている。 $\tan \varphi$ の平面的変化はほぼ 2 つの洗掘穴の相対位置および規模に対応しており、 $\tan \varphi = 0$ の線は最大洗掘点より上流で外岸、下流で内岸に著しく偏っている。すなわち、流れおよび流砂が洗掘穴の上流側で収斂し、下流へ発散していく様子がよくわかる。

Fig. 5 は同じく $t=30'$ の段階で、 150° の洗掘穴を含む $120^\circ \sim 180^\circ$ の範囲における $\tan \varphi$ の半径方向の分布を 10° 毎に精測した結果を示している。外岸付近の分布形に着目すると、 $120^\circ \sim 150^\circ$ では $\partial \tan \varphi / \partial r < 0$ で堆積、 $160^\circ \sim 170^\circ$ では、 $\partial \tan \varphi / \partial r > 0$ で洗掘する

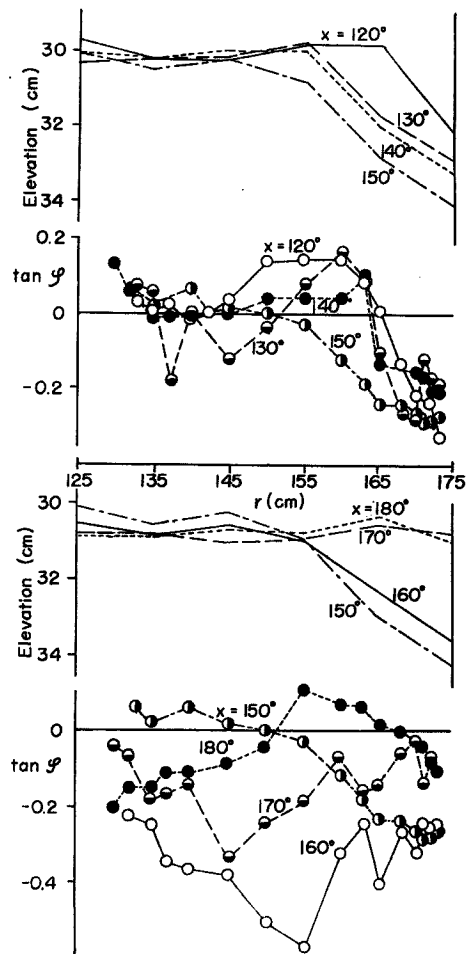


Fig. 5 Radial distribution of flow direction near the scour hole.

傾向を示している。また、前節で問題となった(6)式の $\tan \varphi_0$ は図に示した河床横断形の屈折点付近の $\tan \varphi$ に対応した特性をもつと考えられる。その付近の $\tan \varphi$ の値は $120^\circ \sim 170^\circ$ 間で正から負に変化しており、 150° で 0 に近い。このことから、 $\tan \varphi_0 \propto \partial z_2 / r_0 \partial \theta$ あるいは $\tan \varphi_0 \propto -\partial b / r_0 \partial \theta$ の関係が予測される。しかし、その絶対値には、水深および外岸の曲率も関係すると考えられ、関数形を定めるにはなお検討を必要とする。

4. 彎曲水路における砂堆の特性

4-1 実験の概要

彎曲水路に発生する砂堆の特性を検討するために、Table 2 に示す I ~ IV の 4 種の水路で測定を行なった。III, IV の水路はそれぞれ I, II の水路を外岸から 30 cm の巾をとって垂鉛引鉄板で仕切ったもので、いずれも偏角 180° の単一彎曲水路である。中心曲率半径と水路巾の比は I = 1.5, II = 3.0, III = 2.83, IV = 5.33 であって、II, III の水路がほぼ相似な平面形状をなしている^{註2)}。実験用砂はどの実験ケースも前報で述べた B 砂 (平均粒径 1.74 mm 標準偏差 1.42) を用いた。なお、一部の実験ケースについては上流からの給砂を行なったが、給砂のない場合と砂堆の特性に違いがみられなかったので区別していない。

Table 2 Experimental condition.

Exp. No.	Width	Cent- ral Radius	Bed slope	Disc- charge	Mean Depth	Froud Number	Man- ning Coeff.	U/U_*	Sediment transport rate	
	B	r	i	Q	h	F_r	n		q_B	$q_B \text{ cal.}$
	cm	cm		l/sec	cm		(m-sec)		(cm ² /sec)	(cm ² /sec)
B—I—1	50	75	1/100	6	3.13	0.693	0.0258	6.93	0.176	0.183
2			1/100	8	3.89	0.665	0.0278	6.65	0.229	0.213
3			1/100	10	4.37	0.701	0.0270	7.00	0.221	0.194
4			1/200	4	3.10	0.467	0.0266	6.48	0.00378	0.00546
5			1/200	6						
6			1/200	10						
B—II—1	50	150	1/100	6	3.09	0.705	0.0242	7.05	0.123	0.129
2			1/100	8	3.76	0.703	0.0231	7.02	0.147	0.139
3			1/100	10	4.76	0.615	0.0242	6.15	0.223	0.188
4			1/200	6	3.61	0.552	0.0223	7.89	0.0081	0.0111
5			1/200	8	4.37	0.558	0.0222	7.88	0.0228	0.0283
6			1/200	10	5.06	0.561	0.0219	7.93	0.0253	0.0292
B—III—1	30	85	1/100	3	3.07	0.594	0.0305	5.94	0.120	0.146
2			1/100	4	3.80	0.575	0.0322	6.10	0.200	0.298
3			1/100	6	5.16	0.544	0.0356	7.04	0.348	0.733
4			1/200	4	4.30	0.479	0.0288	4.59	0.0882	0.0363
5			1/200	6	5.65	0.474	0.320	5.72	0.144	0.194
6			1/200	15	10.78	0.451	0.0361	7.54	1.498	1.110
B—IV—1	30	160	1/100	4	3.59	0.624	0.0283	5.69	0.0948	0.188
2			1/100	6	5.36	0.514	0.0365	6.95	0.249	0.682
3			1/200	4	4.31	0.475	0.0273	4.59	0.0489	0.0363
4			1/200	6	5.59	0.482	0.0289	5.23	0.130	0.103
5			1/200	10	8.69	0.415	0.0362	6.53	0.257	0.461

流れの条件および抵抗係数は **Table 2** に示すようであるが、これらの値はいずれも彎曲部を含む上、下流 1 m 区間の平均値であって、流砂量の計算値は (7) 式で $K=30$, $m=2$ とした式から求めた。その計算値はⅢ, Ⅳの水路についても実測値とほぼ対応しており、本実験の場合、平均的流砂量は Brown 型の式で近似できる。

砂堆の挙動の測定は、5～10分間隔で通水を止め砂堆の形状および河床高を詳細に測定する方法と通水状態のまま外岸ぞいの洗掘穴の位置および砂堆の先端の平面位置を2～3分間隔で測定する方法によって行なった。

4-2 彎曲部における砂堆の形態

本実験の流れの条件は、**Table 2** に示すように $F_r=0.4\sim0.7$ であって、ほとんどの場合、上流直線部には顕著な砂堆が発生していない。一部、 $F_r=0.7$ に近い実験で、不規則な砂堆と左右交互の砂礫堆が発生するが、彎曲部および下流直線部の河床形態は砂堆の発生しない場合のそれと形態上の差違は認められなかった。また、前報で細砂(平均粒径 0.058 cm)を用いた実験では、上流側に砂澱が発生したが、その場合にも以下で述べると同様な彎曲部固有の河床形態を示した。

Fig. 6 はⅢ, Ⅳの水路について砂堆の前縁線の時間的変化を示したものである。**Fig. 6** でⅣの水路の場合は図を見易くするために、 $t=5'\sim50'$ の間は2個の砂堆の移動状況だけを描いてある。図に示すように、彎曲部の砂堆は本実験の場合その形状および移動特性からみて流入点付近 $0\sim60^\circ$ に発生する砂堆とその下流に発生する砂堆との2つに分けられる。

まず、流入点付近の砂堆は、**Table 2** に示した実験範囲ではすべて停止し、前縁線の形状も一定している。砂堆の停止する機構は、内岸近くでは3-2で述べたように流向の変化と掃流力の減少によって補給砂がなくなることに基づいており、外岸よりでは彎曲部固有の二次流によって砂堆の前面に補給される砂が下流、内方へ掃流されることによっている。したがって、砂堆が停止した状態では、上流直線部から彎曲部へ

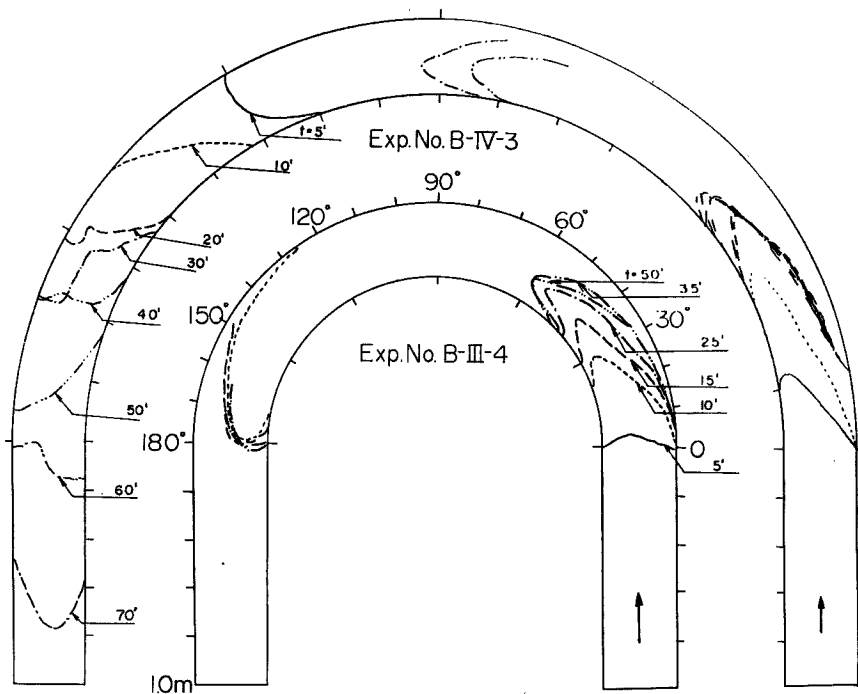


Fig. 6 Configuration and migration of dunes (Bars) in curved reach.

ほぼ直線的に給砂され、その流砂は直線部の左岸延長線と彎曲部外岸との交点付近で絞られたのち砂堆の前縁線にそって、流路巾を拡ろげながら下流へ掃流される。2-2で述べた解析法もこうした事実を加味したものである。

一方、下流に発生する砂堆は曲率半径および掃流力が大きい場合には、Fig. 6 の B-IV-3 の例にみられるように、前縁の先端が、内岸、外岸に偏りながら移動し、前縁線も一定の形状を保持していない。しかし、曲率半径および掃流力が小さい場合には B-III-4 のように下流の砂堆も停止し、前縁線は流入点付近の砂堆と同様に内岸へはりだした形状になる。停止する機構は上述と同様であるが、この場合には、上流から補給される流砂の方向および分布が流入点の砂堆の停止以前と以後とでは、内方より中央へと変化するもので、砂堆の横断形状は流入点の砂堆のそれとは異なる。すなわち、流入点の砂堆は内岸ぞいで堆積高が最大となるが、下流の砂堆は内岸から水路中央間で堆積が最大となる。前報で述べた特性曲線法による横断形状の解析が内岸付近で適合しなかったのは、こうした砂堆の発生による流砂機構の変化を加味できなかったことによる。

下流直線部の流出点付近 ($180^{\circ} \sim 1\text{m}$) では、上述と同様の砂堆が発達するが、それ以降では左右交互の砂礫堆が発生する。それにとまって外岸 (右岸) ぞいの洗掘穴の深さは急激に減少し、下流 1m 以降では彎曲部固有の洗掘穴は消失する。本実験の場合、下流部の砂礫堆もあまり顕著でなく、彎曲部の砂堆の形態との差違は明確であった。

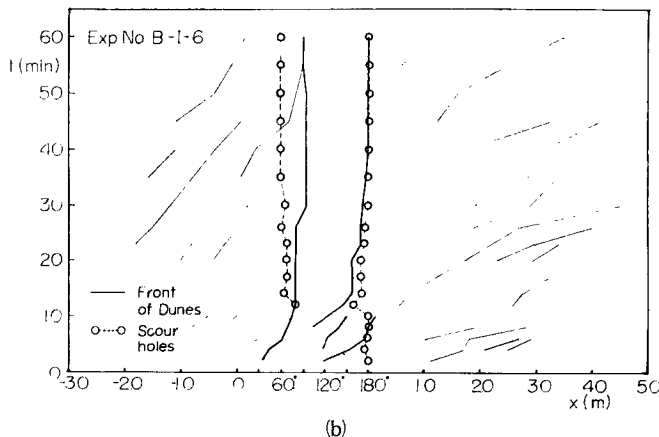
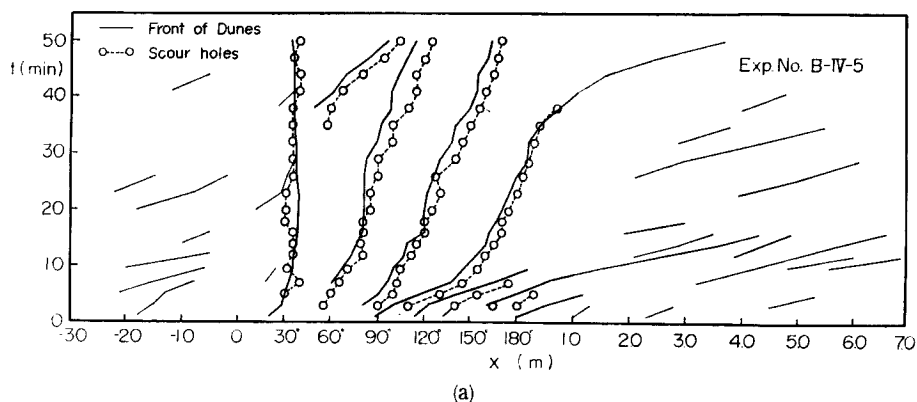


Fig. 7 (a), (b) Migration of front of dunes and scour hole along outside wall.

彎曲部の砂堆は上述のような形態をとるが、砂堆先端の移動に着目してその挙動を時間—水路中心線座標で示すと Fig. 7(a), (b) のようである。これらの図で実線および点線（丸印）はそれぞれ砂堆の先端と洗掘穴の移動を示しており、Fig. 7(a)は彎曲部で砂堆が移動する場合、(b)は停止する場合の一例である。2—1に述べたように、洗掘穴と砂堆の相対位置は移動する場合も停止する場合もほぼ一定しているのがわかる。

4—3 砂堆の波長と移動速度

彎曲部において移動する砂堆は平面的な変形が激しいのでその波長を厳密に定義することは難しい。ここでは、一応、Fig. 7に示した砂堆の走時曲線から彎曲部内で移動する砂堆の先端間の距離を波長 l_d として、各測定時点の波長を求めた。すなわち、先端間の距離を水路中心線上に射影した値を波長としている。

IVの水路で測定された波長の分布を百分率 P で示すと Fig. 8 のようである。波長の測定数が1実験ケースについて50個程度なので、波長の分布はかなり歪んでいるが、0.4 m～2.8 m の範囲で広く分布している。平均波長 $\bar{l}_d$ は 1.2～1.3 m ($\bar{l}_d/B \sim 4$) であって実験条件による違いみられない。また、IIの水路の場合は $\bar{l}_d = 1.1 \sim 1.5$ m ($\bar{l}_d/B = 2 \sim 3$) である。I, IIIの水路については、砂堆の数が彎曲部内で1～3個であって停止する場合が多く、その平均波長はIの水路で $\bar{l}_d = 1.4 \sim 1.9$ m ($\bar{l}_d/B = 3 \sim 4$)、IIIの水路で $\bar{l}_d = 1.2 \sim 1.7$ m ($\bar{l}_d/B = 4 \sim 6$) である。このように本実験の範囲では平均波長はほぼ一定であって、水路形状および流れの条件の影響は認められなかった。

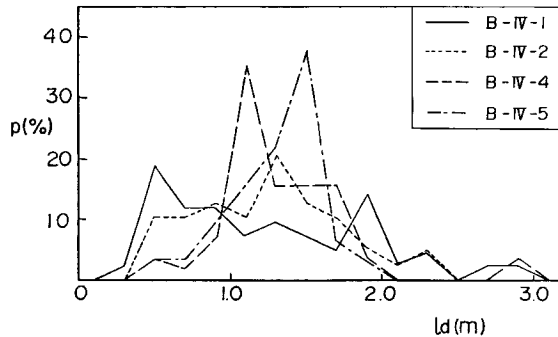


Fig. 8 Distribution (Percentage) of dunes length.

一方、彎曲部流入点で停止する砂堆は、通水初期においては彎曲部固有の二次流に支配され、上流からの補給砂がすべて内岸に移送されるために形成される。芦田、塩見²⁾はこうした点に着目して、固定床における Rozovskii の式から、蛇行水路で停止する砂礫堆の前縁線の形状を求めている。本研究でも同様の手法で流入点の外岸から出発する底面流線と前縁線との比較を行なったが、よい一致をみなかった。これは、彎曲部流入部では主流および二次流の分布が流下方向に顕著に変化することと、3—2で述べたように砂堆の発達にともなう流向変化によると考えられる。

ここでは、単純に砂堆の先端の位置に注目して、水路および実験条件の影響を検討する。Rozovskii の式から先端の位置を決める支配的な量を求めるとつぎのようになる。

$$\frac{dr}{rd\theta} \propto \frac{h}{r} \quad \text{より} \quad \frac{ld_1}{B} \propto \frac{r_1}{h} \quad \text{あるいは} \quad \theta_a \propto \frac{B}{h} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ただし、 ld_1 , θ_a はそれぞれ流入点 ($x=0$) から砂堆の先端までの内岸にそう距離とその偏角、 r_1 は内岸の中心曲率半径である。(20) 式の $\theta_a \sim B/h$ の関係を実験値と比較した結果が Fig. 9 に示されている。曲率半径の小さい場合 (I, III水路) については相関がよいが、大きい場合 (II, IV水路) では、 θ_a は B/h に関係なく一定値を示している。

つぎに、2—2の考察で問題となった砂堆の移動速度について検討する。Fig. 10 はIVの水路について走時曲線から求めた砂堆の先端の移動速度 u_d の流下方向の分布を示したものである。この場合、移動速度は

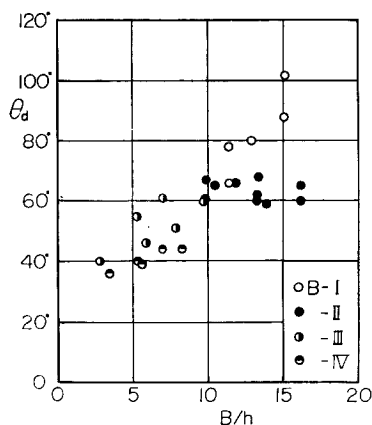


Fig. 9 Relation between positions of front of dunes (Point Bars) θ_d and h/B . [Eq. (20)]

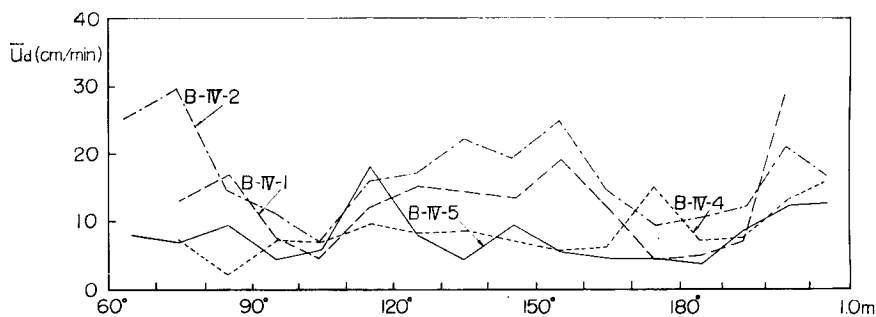


Fig. 10 Longitudinal distribution of mean migration velocity of dunes.

5~40 cm/min の範囲で時間的にも変化する。 $\bar{u}_d$ は各実験ケースについて彎曲部を 10° 毎、下流直線部 ($180^\circ \sim 1$ m) を 0.25 m 毎に区分し、各測点間で時間的に平均した移動速度の値である。図にみるように、 $\bar{u}_d$ の場所的变化は顕著であって、とくに $x=110^\circ$ および 180° 付近で $\bar{u}_d$ が極小となり、その間ではほぼ一様となっている。 110° 、 180° 付近は砂堆の先端の位置が外岸から内方へ偏る点に対応しており、この個所で半径方向への砂堆の移動速度あるいは砂堆の発達が卓越するものと考えられる。また、Fig. 10 と Table 2 との比較から、 $x=110^\circ \sim 180^\circ$ における各実験ケース間の $\bar{u}_d$ の相違は流砂量と相関が大きく、 $\bar{u}_d$ の増加はほぼ流砂量の増加に対応するのがわかる。以上の点を一般化するにはなお検討を必要とするが、2-2の解析を進める上で参考になろう。

5. む す び

本論文では、まず、彎曲水路の外岸における洗掘過程に着目して、洗掘、堆積の境界線と外岸で限られる断面で平均化した次元解析法を提示し、流量が一定で流路巾のみ場所的に変化する条件のもとで基礎式の示す特性を明らかにした。境界線を通じての流水、流砂の出入りおよび流路巾の時間的変化的現象についてはそれぞれ流況測定と砂堆の挙動を観察することによって検討を加えた。

上述の条件の下での解析法については、さらに数値計算を行なって実際の洗掘過程との相違を明らかにする必要があるが、実験結果からはとくに境界線を通じての流れの出入の影響が大きいと考えられ、まずそ

の点を検討するつもりである。また、前論文で述べた初期の一樣洗掘状態から洗掘穴の発生する機構は砂堆の発生、発達に関係するものと思われ、こうした彎曲水路における擾乱の特性を支配する要素について一般的な検討を行ないたいと考えている。

以上のように本論文に述べた解析法については、まだ明らかでない点が多いが、こうした観点から洗掘現象を追求することによって彎曲水路内での流路の固有性が明らかになり、蛇行の発達、彎曲部における水制の機能などの問題を論ずる際に有効な素材を与えるものと思う。

最後に、本研究を進めるに際して御指導、御鞭撻いただいた芦田教授に謝意を表するとともに実験、整理に助力いただいた上田均君に感謝する。

註1) $Q(\theta, t)$ の場合、(3) 式に対応した流れの連続式は次式となる。

$$-\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q}{u_2} \right) + \frac{\partial Q}{r_2 \partial \theta} = \left(1 - \frac{b}{r_2} \right) \left(\bar{h} - \frac{1}{2} z_2 \right) \left\{ \frac{\partial b}{\partial t} + \frac{u_2}{r_2} \frac{\partial b}{\partial \theta} + \left(1 - \frac{b}{r_2} \right) u_2 \tan \varphi_0 \right\}$$

註2) 彎曲部を円弧近似した場合、蛇行波長 l_m と中心曲率半径 r_c 、偏角 θ との関係は水路巾 B で無次元表示すると

$$\frac{l_m}{B} = 4 \frac{r_c}{B} \sin \frac{\theta}{2}$$

となり、 $l_m/B = 6 \sim 12$ 、 $\theta = 180^\circ$ に対して、 $r_c/B = 1.5 \sim 3$ となる。実際河川においてもこの曲率半径比の彎曲部の頻度が高い。

参 考 文 献

- 1) 村本嘉雄，坂本忠彦，吉村知司：彎曲水路の河床変動に関する研究，京大防災研究所年報，第11号B，昭和43.3.
- 2) 芦田和男，塩見靖国：水路における砂礫堆の水理特性について，京大防災研究所年報，第9号，昭和41.3.